



# 海藻寡糖增效尿素与有机肥在大豆上的配合施用效果研究

张运红, 和爱玲, 姚 健, 杨占平, 张洁梅, 潘晓莹, 史福刚, 骆晓声

(河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所/河南省农业生态与环境重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘 要:**为提高氮肥利用效率, 实现大豆节约化生产, 采用盆栽试验, 研究了海藻寡糖增效尿素配施 4 种有机肥(精致有机肥、腐殖酸有机肥、海藻有机肥和炭基肥)对大豆光合特性、产量及氮肥利用效率的影响。结果表明:和普通尿素相比, 同等施氮量条件下, 海藻寡糖增效尿素处理可提高大豆生育前期功能叶片 SPAD 值和净光合速率, 总干物质累积量及产量分别显著增加 22.5% 和 9.7%, 根瘤数、氮素累积量及利用效率也显著高于普通尿素处理; 80% 施氮量处理, 单株氮素累积量较全量处理显著下降 7.3%, 但产量、氮素利用效率和氮素干物质生产效率均显著增加, 增幅分别为 5.3%、12.6% 和 5.4%。此外, 80% 施氮量条件下, 海藻寡糖增效尿素和 4 种有机肥配施的大豆主茎节数、单株总荚数和根瘤数均显著高于单施海藻寡糖增效肥; 与腐殖酸有机肥配施还可提高籽粒和荚皮干物质所占比率, 降低秸秆所占比率, 提高其产量 3.6%; 与海藻肥配施可提高大豆开花期净光合速率、根瘤数和氮素利用效率; 与炭基肥配施可提高生育前期功能叶片 SPAD 值和净光合速率, 促进干物质及氮素积累。综合而言, 本试验条件下, 海藻寡糖增效尿素与腐殖酸有机肥和炭基肥配施对大豆的节肥增产效果较好。

**关键词:**大豆; 海藻寡糖增效尿素; 有机肥; 光合特性; 产量; 氮肥利用率

## Studies on the Effects of Combined Application of Alginate-derived Oligosaccharides Synergistic Urea and Organic Manures in Soybean

ZHANG Yun-hong, HE Ai-ling, YAO Jian, YANG Zhan-ping, ZHANG Jie-mei, PAN Xiao-ying, SHI Fu-gang, LUO Xiao-sheng

(Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences/Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to improve nitrogen use efficiency and achieve economical production of soybeans, pot experiment was carried out to study the effects of combined application of alginate-derived oligosaccharides (ADO) synergistic urea and different organic fertilizer (exquisite organic fertilizer, humic acid fertilizer, seaweed granular fertilizer and biochar) on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen (N) utilization efficiency of soybean. The results showed that compared with common urea, ADO synergistic urea raised the SPAD value and net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of functional leaves under the same N level, and total dry matter accumulation and yield were also significantly increased by 22.5% and 9.7%, respectively. Moreover, root nodule number, N accumulation and utilization efficiency were significantly higher than those of common urea treatment. N accumulation of 80% N level treatment was significantly decreased by 7.3% compared to that of full N level treatment, but its yield, N utilization efficiency and dry matter produce efficiency were significantly increased by 5.3%, 12.6% and 5.4%, respectively. In addition, under the condition of 80% N level, the numbers of nodes on main stem, total pods and root nodules per plant of the treatments of combined application of ADO synergistic urea and four organic manures were significantly higher than those of the only ADO synergized urea treatment. Moreover, the combined application of ADO synergistic urea and humic acid fertilizer raised the proportion of grain and pod shell and reduced the proportion of stalk, thereby increased the yield by 3.6%. The combined application of ADO synergistic urea and seaweed granular fertilizer raised  $P_n$  at flowering stage, root nodule number and N utilization efficiency. The combined application of ADO synergistic urea and biochar raised the SPAD value and  $P_n$  of functional leaves at early growth period, and promoted the accumulation of dry matter and N. Overall, the combined application of ADO synergistic and humic acid fertilizer or biochar had better yield and fertilizer-saving effects in soybean under the condition of experiment.

**Keywords:** Soybean [*Glycine max* (L.) Merr]; Alginate-derived oligosaccharides (ADO) synergistic urea; Organic manure; Photosynthetic characteristics; Yield; Nitrogen utilization efficiency

大豆 [*Glycine max* (L.) Merr] 是重要的粮食和油料作物。氮素是构成生命物质的基本元素之一, 在大豆生长发育和产量形成中发挥着重要作用。

大豆吸收氮素主要有 3 个来源: 土壤氮素、化学氮肥与生物固氮, 其中生物固氮是豆科作物特有的功能, 但其所固定的氮素仅占大豆一生对氮素需求量

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 河南省科技公关计划项目 (172102310467); 河南省农业科学院自主创新项目 (2060302)。

第一作者简介: 张运红 (1983 -), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: snowgirl23@126.com。

通讯作者: 姚健 (1959 -), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养和土壤农化研究。E-mail: 13676942172@163.com。

的 50%~60%,远不能满足大豆对氮素营养的需求,故农业生产中还必需施用氮肥<sup>[1-2]</sup>。有研究显示,田间条件下施入适量氮肥能促进大豆植株生长,有利于根瘤着生和提高固氮能力<sup>[3]</sup>,且该效应受氮源种类、品种基因型和栽培措施等因素的影响<sup>[4-6]</sup>。尿素作为目前我国农业生产中应用最广泛的氮肥品种,施入土壤后经挥发、淋溶和反硝化,氮素损失率达 14%~45%,已成为农业生态系统中重要的污染源,引起环境工作者和农业决策者的高度关注<sup>[7]</sup>。如何提高氮肥利用效率,减少化学氮肥投入,促进耕地质量和作物生产可持续发展已成为农业生产中迫切需要解决的重要课题。研制和发展新型增效氮肥是提高氮肥利用率的重要措施之一。谷思玉等<sup>[8]</sup>研究证实多肽尿素和长效缓释尿素处理的大豆产量和氮肥利用率均高于普通尿素处理,有助于解决尿素施用的环境污染问题。盖志佳等<sup>[9]</sup>报道和普通尿素相比,施用合理水平的生物糖氮肥可促进大豆根瘤的生长和发育。海藻寡糖(ADO)是海藻酸钠经酶解的产物,适量施用可促进植物根系生长及对矿质营养元素的吸收<sup>[10]</sup>。张朝霞等<sup>[11]</sup>研究表明将其添加到尿素中配制成的海藻寡糖增效尿素可促进小麦增产,提高其氮肥利用率。我们最近的研究显示,海藻寡糖增效尿素对水稻的产量和品质也有一定的改善效果<sup>[12]</sup>。海藻寡糖增效尿素具有绿色环保、多功能等优点,然而,目前该产品在大豆生产中的应用还较为少见。此外,有机肥在改良土壤结构、改善农产品品质等方面具有特殊作用<sup>[13-14]</sup>。赵丽琴等<sup>[13]</sup>研究表明,有机无机肥配施可促进大豆对氮磷钾养分的吸收。张伟明等<sup>[14]</sup>研究显示生物炭与化肥互作在大豆上具有明显的增产提质效应。然而,不同有机肥的培肥效果及环境效应存在差异<sup>[15]</sup>。为此,本文研究了海藻寡糖增效尿素与 4 种不同有机肥配施在大豆上的节肥增产效果,旨在为提高氮肥利用率,构建大豆绿色生产模式及促进农业可持续发展提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2017 年 6-9 月在河南省农业科学院科研园区进行。供试土壤采自河南省郑州市郊区,土壤类型为潮土,有机质  $2.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效氮  $44.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、速效磷  $9.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、速效钾  $98.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , pH 8.12。供试大豆品种为郑 196,由河南省农业科学院经济作物研究所选育,为优质高产抗病品种。

供试炭基肥( $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 5\%$ ,有机质 46%)由商丘三利新能源有限公司提供;腐植酸有

机肥(腐植酸含量  $\geq 30\%$ ,  $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 10\%$ ,微量元素含量  $\geq 4\%$ )由山东泉林嘉有肥料有限责任公司提供;海藻肥( $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 6\%$ ,有机质  $\geq 45\%$ )由青岛海大生物集团提供;普通尿素( $\text{N} 46.4\%$ )由河南省心连心化肥有限公司提供;海藻寡糖增效尿素( $\text{N} 46\%$ )由河南省农业生态与环境重点实验室自主研制。

### 1.2 试验设计

采用盆栽试验,选用聚乙烯塑料盆(直径 30 cm,高 20 cm),每盆装过 2 mm 筛的土 10 kg。选用氮肥种类为供试尿素,磷肥和钾肥种类分别选用过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5 10\%$ )和氯化钾( $\text{K}_2\text{O} 60\%$ ),施用量分别为  $\text{N} 0.125 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 0.25 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O} 0.143 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,全部基施。设置 8 个处理,分别为:处理 1:对照,不施氮肥(CK);处理 2:100% 普通尿素(100% UN);处理 3:100% 海藻寡糖增效尿素(100% AUN);处理 4:80% 海藻寡糖增效尿素(80% AUN);处理 5:80% 海藻寡糖增效尿素 + 精制有机肥(80% AUN + JM);处理 6:80% 海藻寡糖增效尿素 + 腐植酸有机肥(80% AUN + FM);处理 7:80% 海藻寡糖增效尿素 + 海藻肥有机肥(80% AUN + HM);处理 8:80% 海藻寡糖增效尿素 + 炭基肥(80% AUN + CM)。每个处理 3 次重复。精致有机肥、腐植酸有机肥、海藻肥和炭基肥的施用量均为每盆 10 g,与土壤充分混匀后装盆。每盆播种 6 粒,三叶期定苗至每盆 4 株。大豆生长期间通过称重法维持盆中土壤水分含量在田间持水量的 70% 左右。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高和 SPAD 值 分别于大豆苗期、开花期、结荚期和成熟期用直尺测量大豆株高;于苗期、开花期、结荚期和鼓粒期用 SPAD-502 叶绿素仪测定大豆功能叶片(倒 4 叶)SPAD 值。

1.3.2 光合指标 于开花期晴天 9:00-11:00,采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合作用测定仪测定大豆功能叶片(倒 4 叶)净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、二氧化碳浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $Tr$ )<sup>[14]</sup>,光照强度为  $800 \sim 1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,叶室( $2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ )内设定温度为  $35^\circ\text{C}$ ,采用开放气路,设定空气流速为  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 。并计算气孔限制值( $L_s$ )和水分利用效率( $WUE$ ),  $L_s = 1 - C_i/C_0$  ( $C_0$  代表气孔中  $\text{CO}_2$  浓度为  $420 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $WUE = P_n/Tr$ 。

1.3.3 产量及农艺指标 收获时调查大豆结荚高度、主茎节数、有效分枝数、有效荚数、无效荚数、总荚数、根瘤数、籽粒产量和百粒重,其中结荚高度采用直尺测量,农艺指标和根瘤数目采用人工计数

法,产量相关指标采用称重法;此外,将成熟期样品洗净后秸秆、荚皮、根和籽粒分别装袋,105℃下杀青30 min后,于80℃下烘至恒重并称干重。

1.3.4 氮含量及氮素利用效率 取成熟期烘干的各组织样品,粉碎后采用浓  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮-流动分析仪法测定全氮含量,氮素相关指标按以下公式计算<sup>[16]</sup>:植株氮累积量=植株地上部分(秸秆、荚皮和籽粒)氮素累积量的总和;氮素利用效率(%)=籽粒产量/植株地上部氮累积量×100;氮素干物质生产效率(%)=植株干物质总量/植株氮累积总量×100。

1.4 数据处理与分析

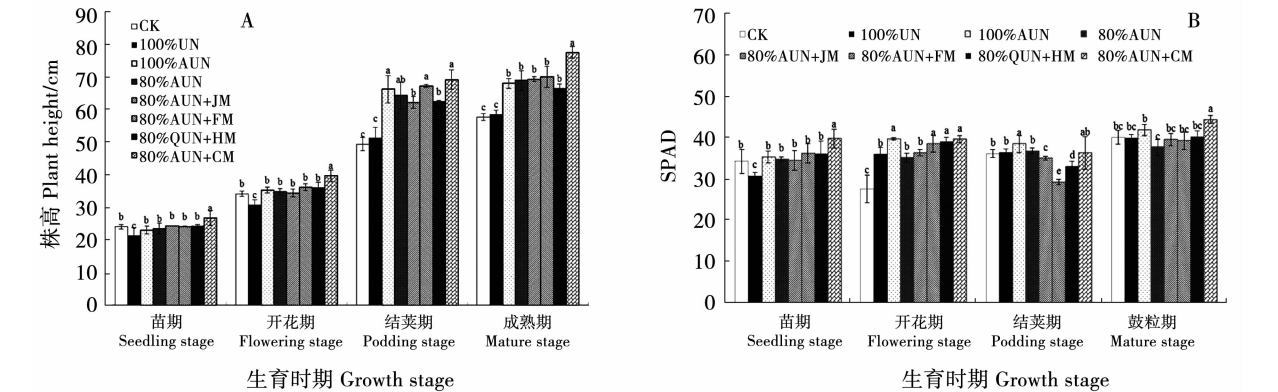
采用 Excel 2007 进行数据处理,SPSS 17.0 进行方差分析,并采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大豆株高和 SPAD 值的影响

如图 1A 所示,苗期和开花期,80% AUN + CM 处理的大豆株高显著高于其它处理,100% UN 处理最低,其余处理间无显著差异;结荚期和成熟期,所有 AUN 处理的大豆株高均显著高于对照和 100% UN 处理,其中结荚期分别较之增高 25.8% ~

40.0% 和 21.0% ~ 34.6%,以 80% AUN + CM、80% AUN + FM 和 100% AUN 处理最高;成熟期,分别较之增加 15.2% ~ 34.4% 和 13.7% ~ 32.6%,以 80% AUN + CM 处理最高。如图 1B 所示,苗期,80% AUN + CM 处理的大豆功能叶片 SPAD 值最高,100% UN 处理的最低;开花期,80% AUN + FM、80% AUN + HM、80% AUN + CM 及 100% AUN 处理的 SPAD 值显著高于对照和 100% UN 处理,分别较对照增加 39.8%、41.6%、43.6% 和 44.0%,较 100% UN 处理增加 7.1%、8.5%、10.1% 和 10.4%;结荚期,100% AUN 处理的大豆功能叶片 SPAD 值最高,分别较对照和 100% UN 处理增加 6.6% 和 5.7%,80% AUN + JM、80% AUN + FM 和 80% AUN + HM 则较二者显著下降,降幅分别为 3.2%、19.2%、8.3% 和 4.0%、19.8%、9.1%;鼓粒期,80% AUN + CM 处理的大豆功能叶片 SPAD 最高,其余处理间差异较小。该结果表明,同等施氮量或 80% 施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素主要通过提高生育前期大豆功能叶片叶绿素含量,从而促进光合作用的进行,加快大豆生长发育,以 80% AUN + CM 处理效果最好。



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。  
Different lowercase above the columns mean significant difference between different treatments at the same growth stage ( $P < 0.05$ ), the same as below.

图 1 不同处理对大豆株高和功能叶片 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on plant height and SPAD value of soybean function leaves

2.2 不同处理对开花期大豆光合特性的影响

施氮处理的大豆开花期功能叶片  $P_n$  较对照显著增加 41.1% ~ 58.4%,以 100% AUN 处理最高,较 100% UN 处理也显著增加 8.4%;此外,80% AUN + HM 和 80% AUN + CM 处理的  $P_n$  较 80% AUN 处理显著增加 6.2% 和 9.1%。所有 AUN 处理的大豆  $WUE$  和  $C_i$  均显著低于对照和 100% UN 处理,其中  $WUE$  分别较之降低 8.5% ~ 21.0% 和 10.8% ~ 23.0%,以 80% AUN + FM 和 80% AUN + HM 降幅

最大; $C_i$  分别较之降低 9.4% ~ 14.4% 和 7.8% ~ 13.0%,以 80% AUN + CM 处理降幅最大。100% AUN、80% AUN + JM 和 80% AUN + HM 处理的大豆  $G_s$  均显著高于对照,增幅分别为 34.5%、21.8% 和 25.5%;但显著低于 100% UN 处理 28.2%、35.0% 和 33.0%。所有 AUN 处理的大豆  $Tr$  和  $L_s$  均显著高于对照和 100% UN 处理,其中  $Tr$  分别较之增加 68.3% ~ 81.5% 和 18.1% ~ 27.4%,以 100% AUN、80% AUN + JM 和 80% AUN + HM 处理增幅最大; $L_s$

分别较之增加 34.5% ~52.8% 和 30.4% ~44.4% , 以 80% AUN + CM 处理增幅最大(表 1)。该结果表明,和普通尿素相比,同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素可提高大豆光合速率,从而有利于碳水化合物累积;80% 施氮量条件下,与有机肥配施的效果好于单施,以 80% AUN + CM 处理效果为佳。

表 1 不同处理对大豆光合特性的影响

Table 1 Effect of different treatments on photosynthesis characteristics of soybean

处理 Treatment	净光合速率 $P_n$ / ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	水分利用效率 $WUE$ / ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	气孔导度 $G_s$ / ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ /( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	蒸腾速率 $Tr$ /( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气孔限制值 $L_s$
CK	13.93 d	2.208 a	0.55 c	330.23 a	6.31 d	0.214 c
100% UN	20.36 b	2.265 a	1.03 a	324.74 a	8.99 c	0.227 c
100% AUN	22.07 a	1.928 b	0.74 b	299.14 b	11.45 a	0.288 b
80% AUN	19.66 c	1.789 d	0.62 bc	294.69 b	10.99 b	0.298 b
80% AUN + JM	19.95 bc	1.745 d	0.67 b	297.82 b	11.43 a	0.291 b
80% AUN + FM	20.09 bc	1.810 c	0.62 bc	290.92 bc	11.10 ab	0.307 b
80% AUN + HM	20.87 b	1.849 c	0.69 b	295.48 b	11.29 a	0.296 b
80% AUN + CM	21.45 ab	2.020 b	0.57 c	282.55 c	10.62 b	0.327 a

同列数字后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。下同。  
Different lowercase in the same column refer to significant difference at 5% , respectively. The same as below.

2.3 不同处理对大豆农艺指标的影响

施氮处理的大豆结荚高度较对照显著下降 33.8% ~42.7% ,但不同施氮处理间无显著差异。80% AUN + CM、80% AUN + FM、80% AUN + HM 以及 100% AUN 处理的大豆主茎节数均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 20.3%、11.5%、8.0%、11.5% 和 21.0%、12.2%、8.7%、12.2% ; 80% AUN 处理较对照和 100% UN 处理显著下降 8.0% 和 7.4%。所有施氮处理的大豆有效分枝数是对照的 2.47 ~3.55 倍,以 80% AUN + CM 处理最

高,较 100% UN 处理也显著增加 27.7%。所有施氮处理的大豆根瘤数也均显著高于对照,以 80% AUN + HM 处理根瘤数最多,分别较对照和 100% UN 处理增加 4.91 ~4.16 个(表 2)。该结果表明,施氮可增加大豆的有效分枝数和根瘤数,降低结荚高度;同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素效果好于普通尿素;80% 施氮量条件下,与有机肥配施的效果好于单施,以 80% AUN + CM 和 80% AUN + HM 处理效果为佳。

表 2 不同处理对大豆农艺指标的影响

Table 2 Effect of different treatments on agronomic characteristics of soybean

处理 Treatment	结荚高度 Bottom-pot height/cm	主茎节数 Nodes on main stem	有效分枝数 Number of branches	根瘤数 Number of root nodules
CK	12.35 a	9.42 c	1.08 c	0.42 f
100% UN	7.81 b	9.36 c	3.00 b	1.17 e
100% AUN	7.46 b	10.50 b	3.58 ab	3.50 c
80% AUN	7.42 b	8.67 d	2.92 b	3.08 d
80% AUN + JM	8.17 b	9.33 c	2.92 b	4.17 b
80% AUN + FM	7.08 b	10.50 b	2.83 b	3.83 b
80% AUN + HM	8.17 b	10.17 b	2.67 b	5.33 a
80% AUN + CM	7.08 b	11.33 a	3.83 a	4.17 b

2.4 不同处理对大豆干物质积累及分配的影响

所有 AUN 处理的大豆秸秆干物质重均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 27.1% ~71.9% 和 12.9% ~52.6% ,以 100% AUN 和 80% AUN 处理最高。100% AUN、80% AUN + CM、80% AUN + HM、80% AUN + FM 处理的荚皮干物质重均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加

13.6%、18.1%、12.6%、8.2% 和 13.3%、17.8%、12.3%、7.9%。100% AUN、80% AUN、80% AUN + FM 和 80% AUN + CM 处理的根干物质重均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较对照增加 58.7%、61.3%、58.7% 和 57.3% ,较 100% UN 处理增加 21.4%、23.5%、21.4% 和 20.4%。所有 AUN 处理的籽粒干物质重和总干物质重均显著高于对照和

100% UN 处理,其中籽粒干物质重分别较之增加 19.2% ~ 30.0% 和 9.7% ~ 9.0%,以 80% AUN + FM 处理增幅最大;总干物质重分别较之增加 21.2% ~ 31.9% 和 12.8% ~ 22.8%,以 80% AUN + CM 和 80% AUN 处理增幅最大(表 3)。

除 80% AUN + FM 处理外,其余 AUN 处理的大豆秸秆干物质所占比率均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 13.9% ~ 30.5% 和 8.8% ~ 24.6%,以 100% AUN 和 80% AUN 处理增幅最大。AUN 处理的荚皮干物质所占比率显著较对照低 10.4% ~ 18.2%,以 80% AUN 和 80% AUN + JM 处理降幅最大。80% AUN 和 80% AUN + FM 处理的根

干物质所占比率显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 24.7%、28.9% 和 2.8%、6.3%;80% AUN + JM 处理则分别较之显著降低 21.7% 和 35.4%。80% AUN + FM 处理的籽粒干物质所占比率显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 5.7% 和 4.6%,100% AUN 处理则分别较之显著下降 9.5% 和 10.5%(表 3)。该结果表明,同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素可促进大豆干物质积累,提高秸秆干物质所占比率,降低籽粒所占比率;80% 施氮量条件下,与腐殖酸有机肥配施可提高籽粒和荚皮干物质所占比例,降低秸秆干物质所占比例。

表 3 不同处理对大豆干物质积累及分配的影响  
Table 3 Effect of different treatments on the accumulation and distribution of dry matter in soybean

处理 Treatment	干物质累积量 Accumulation of dry matter/(g·plant <sup>-1</sup> )					干物质分配比率 Distribution rate of dry matter/%			
	秸秆 Stalk	荚皮 Pod shell	根 Root	籽粒 Seed	总生物量 Total biomass	秸秆 Stalk	荚皮 Pod shell	根 Root	籽粒 Seed
CK	8.15 d	10.20 c	0.75 c	12.91 d	32.02 d	25.46 c	31.87 a	2.35 c	40.32 b
100% UN	9.18 c	10.23 c	0.98 b	14.03 c	34.42 c	26.67 c	29.73 ab	2.85 b	40.76 b
100% AUN	14.01 a	11.59 ab	1.19 a	15.39 b	42.18 a	33.22 a	27.48 bc	2.82 b	36.48 c
80% AUN	13.21 a	10.76 bc	1.21 a	16.08 ab	41.25 a	32.02 a	26.07 c	2.93 a	38.98 bc
80% AUN + JM	11.65 b	10.16 c	0.72 c	16.29 ab	38.82 b	30.01 b	26.17 c	1.84 d	41.97 ab
80% AUN + FM	10.36 b	11.04 b	1.19 a	16.78 a	39.37 b	26.31 c	28.03 b	3.03 a	42.62 a
80% AUN + HM	11.67 b	11.49 ab	1.09 ab	15.98 ab	40.23 ab	29.01 b	28.55 b	2.72 b	39.72 b
80% AUN + CM	12.66 ab	12.05 a	1.18 a	16.36 ab	42.26 a	29.97 b	28.52 b	2.80 b	38.72 bc

2.5 不同处理对大豆产量及其构成因子的影响

所有 AUN 处理的大豆有效荚数均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 20.8% ~ 28.5% 和 12.4% ~ 19.6%,以 80% AUN + HM、80% AUN + CM 和 80% AUN + JM 处理效果最好。100% AUN、80% AUN + CM、80% AUN + HM 和 80% AUN + FM 处理的大豆无效荚数也均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 173.0%、160.6%、92.7%、67.7% 和 135.2%、124.5%、66.1%、44.5%。所有 AUN 处理的大豆总荚数也均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 19.6% ~ 43.7% 和 10.2% ~ 32.5%,以 80% AUN + CM、80% AUN + HM 及 100% AUN 处理最高。所有施氮处理的大豆百粒重均显著高于对照,增幅为 4.4% ~ 12.3%,以 80% AUN + HM 处理增幅最大。所有 AUN 处理的大豆产量均显著高于对照和 100% UN 处理,较对照增加 19.2% ~ 30.0%,较 100% UN 处理增加 9.7% ~ 19.6%,以 80% AUN + FM 效果最好(表 4)。该结果表明,同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素增产效果好于普通尿素;80% 施氮量条件下,与腐殖酸有机肥配施增

产效果优于单施。

2.6 不同处理对大豆氮素累积及利用效率的影响

图 2 显示,100% AUN、80% AUN + JM 和 80% AUN + CM 处理的大豆单株氮累积量显著高于对照和 100% UN 处理,分别较之增加 18.9%、18.3%、26.9% 和 5.5%、5.0%、12.6%,以 80% AUN + CM 处理最高;此外,80% AUN + FM 处理的单株氮累积量也显著高于对照 13.9%。所有 AUN 处理的氮素利用效率均显著高于 100% UN 处理,增幅为 3.6% ~ 23.9%,以 80% AUN + HM 处理最高,其次是 80% AUN 和 80% AUN + FM 处理;此外,80% AUN、80% AUN + JM、80% AUN + FM 和 80% AUN + HM 处理也均显著高于对照,分别较之增加 13.0%、6.6%、14.2%、19.5%。100% AUN、80% AUN、80% AUN + FM 和 80% AUN + HM 处理的氮素干物质生产效率均显著高于对照和 100% UN 处理,分别较对照增加 10.9%、16.9%、8.0% 和 21.2%,较 100% UN 增加 16.2%、22.5%、13.2% 和 27.1%,以 80% AUN 和 80% AUN + FM 处理最高。该结果表明,同等施氮量条件下,和普通尿素相比,海藻寡糖增效尿素可

促进大豆对氮素的吸收,提高其利用效率;80%施氮量条件下,与炭基肥配施可提高植株氮累积量,但氮素利用效率则以与海藻肥配施最高。

表 4 不同处理对大豆产量及其构成因子的影响

Table 4 Effect of different treatments on the yield and its components of soybean					
处理 Treatment	有效荚数 Number of available pods	无效荚数 Number of invalid pods	单株总荚数 Number of total pods	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(g·plant <sup>-1</sup> )
CK	33.67 d	4.67 d	38.33 f	21.22 d	12.91 e
100% UN	36.17 c	5.42 d	41.58 e	22.61 b	14.03 d
100% AUN	40.92 b	12.75 a	53.67 ab	22.15 c	15.39 c
80% AUN	40.67 b	5.17 d	45.83 d	22.63 b	16.20 b
80% AUN + JM	42.25 a	6.42 cd	48.67 c	23.27 ab	16.29 ab
80% AUN + FM	41.25 ab	7.83 c	49.08 c	22.91 b	16.78 a
80% AUN + HM	43.25 a	9.00 b	52.25 ab	23.84 a	15.98 b
80% AUN + CM	42.92 a	12.17 a	55.08 a	23.09 b	16.36 ab

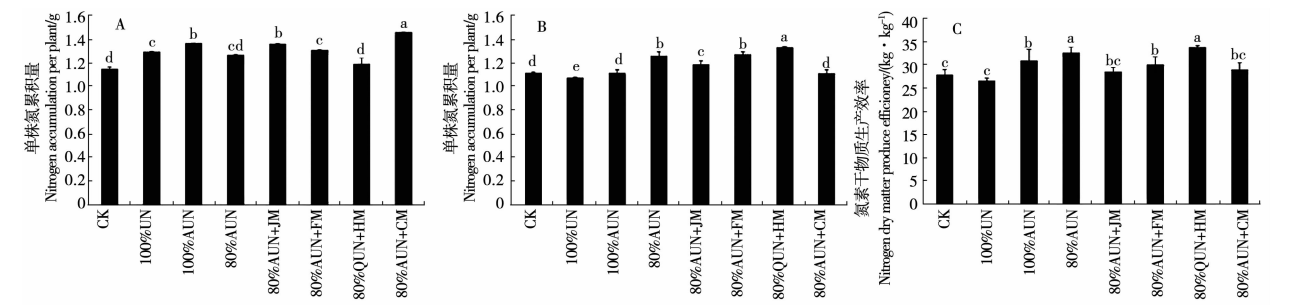


图 2 不同处理对大豆氮素累积及养分利用效率的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on the accumulation and nutrient utilization efficiency of nitrogen in soybean

3 讨论

施肥是农业生产中补充养分的重要措施,适量施用氮肥,既可充分利用大豆的固氮功能,增加大豆有效根瘤,也可达到节约氮肥、节本增效的目的<sup>[2-3,8,15]</sup>。本研究结果表明,施氮可提高大豆净光合速率,促进干物质累积,并可降低结荚高度,增加有效分枝数、总荚数及根瘤数,进而促进产量及百粒重增加。赵力汉等<sup>[17]</sup>研究指出,氮素对提高大豆叶面积指数、光合势、叶绿素含量及生长率均有促进作用,生育前期这种促进作用更为显著。王树起等<sup>[2]</sup>报道,施用适量氮肥对大豆植株生物量、氮素吸收和利用、籽粒产量和品质均有促进效果。本研究结果与前人报道基本一致<sup>[2,17]</sup>。此外,本研究还显示,和普通尿素相比,同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素可提高大豆生育前期功能叶片 SPAD 值和净光合速率,干物质累积及产量也显著增加;根瘤数、氮素累积量及利用效率也高于普通尿素处理;80%施氮量处理,单株氮素累积量较全量处理显著下降,但产量进一步增加,这可能主要归因于氮素利用效率和氮素干物质生产效率的提高。不同氮肥氮素形态及转化存在有差异<sup>[18-19]</sup>。周勇明

等<sup>[20]</sup>报道,海藻酸尿素可显著提高玉米产量和籽粒吸氮量,氮肥表观利用率和农学效率分别较普通尿素提高 2.94 个百分点和 26%。我们前期的研究显示,海藻寡糖增效尿素可提高玉米功能叶片叶绿素含量和净光合速率,还能促进玉米对氮、磷、钾的吸收,同等施氮条件下其施用效果优于腐植酸尿素和聚能网尿素<sup>[21]</sup>;对水稻产量和品质也有一定的改善效果<sup>[12]</sup>。从目前的研究来看,海藻寡糖增效尿素促进作物生长和养分吸收可能主要归因于以下两个方面:一是海藻寡糖可通过增加光饱和点(LSP)、降低光补偿点(LCP),扩大其光强可利用范围,从而有利于光能的捕获和转化,进而促进碳水化合物的积累和产量的形成<sup>[22-23]</sup>;二是海藻寡糖可与二价金属阳离子迅速反应而发生物理交联,并可通过这种物理交联将尿素水溶液转变为水凝胶,从而吸附土壤溶液中无机磷及其它养分离子,起到保水保肥的作用<sup>[24-26]</sup>。

有机肥能够释放有机酸,从而促进作物对养分的吸收,提高肥料利用率和作物产量;还可增加土壤微生物数量,改善土壤结构;因此,有机无机配合施用是保证作物产量、降低氮肥投入、维护农业生态环境的重要农艺措施之一<sup>[27-28]</sup>。本研究显示,

80%施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素和4种有机肥配施的大豆主茎节数、单株总荚数和根瘤数均显著高于单施处理;此外,与腐殖酸有机肥配施可提高籽粒和荚皮干物质所占比率,降低秸秆所占比率,进而提高大豆产量;与海藻肥配施可提高开花期净光合速率、根瘤数和氮素利用效率;与炭基肥配施可提高生育前期功能叶片SPAD值和净光合速率,从而促进干物质及氮素积累。前人研究显示,腐殖酸含有羧基、酚羟基和醌基等活性基团,有较强的离子交换和吸附性能,能降低铵态氮的损失及土壤对速效磷的固定,其本身也具有良好的化学活性和生物活性,可促进作物生物量积累和产量提高<sup>[29]</sup>;海藻有机肥含有大量的有机物质以及多种矿物质元素,还含有特殊的海藻多糖、高度不饱和脂肪酸和多种天然植物生长调节剂,具有促生、增产、改良土壤、抗病等特点<sup>[30]</sup>;炭基肥对作物所需养分氮、磷有较好的持留作用,并可有效改善土壤理化性质,提高土壤保水、保肥能力<sup>[31-32,14]</sup>,这可能是本研究中海藻寡糖增效尿素与有机肥配施效果优于单施的原因。

4 结 论

与普通尿素相比,同等施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素处理可加快大豆生育前期光合作用的进行,促进干物质累积,提高其氮肥利用效率;80%施氮量处理,单株氮素累积量较全量处理显著下降,但产量、氮素利用效率和氮素干物质生产效率均显著增加。此外,80%施氮量条件下,海藻寡糖增效尿素和4种有机肥配施的大豆主茎节数、单株总荚数和根瘤数均显著高于单施海藻寡糖增效肥;综合而言,本试验条件下,海藻寡糖增效尿素与腐殖酸有机肥和炭基肥配施在大豆上的节肥增产效果较好,该研究对减少化肥投入,降低环境风险,实现节本增效及农田生态环境可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 关大伟,李力,岳现录,等. 我国大豆的生物固氮潜力研究[J]. 植物营养与肥科学报,2014,20(6):1497-1504. (Guan D W, Li L, Yue X L, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6):1497-1504. )

[2] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(6):1069-1073. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels [J]. Chinese Journal of Eco-Ag-

riculture, 2009, 17(6):1069-1073. )

[3] 刘丽君,孙聪妹,刘艳,等. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报,2005,36(2):133-137. (Liu L J, Sun C S, Liu Y, et al. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves [J]. Journal of North-east Agricultural University, 2005, 36(2):133-137. )

[4] 郭海龙,马春梅,董守坤,等. 春大豆生长中对不同氮源的吸收利用[J]. 核农学报,2008,22(3):338-342. (Guo H L, Ma C M, Dong S K, et al. Absorption and utilization of different nitrogen sources during the growth of soybean plant [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008, 22(3):338-342. )

[5] 李俊华,董志新,刘建国,等. 不同基因型大豆氮效率的研究[J]. 土壤通报,2005,36(3):352-356. (Li J H, Dong Z X, Liu J G, et al. Study on nitrogen efficiency on different genotype soybean [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 352-356. )

[6] 刘玉平,李志刚,李瑞平. 不同密度与施氮水平对高油大豆产量及品质的影响[J]. 大豆科学,2011,30(1):79-82,88. (Liu Y P, Li Z G, Li R P. Effects of different planting densities and N-fertilizer levels on yield and quality of soybean [J]. Soybean Science, 2011, 30(1):79-82,88. )

[7] 于淑芳,杨力,张民,等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1744-1749. (Yu S F, Yang L, Zhang M, et al. Effects of controlled-release urea on wheat-corn's yield and soil nitrogen [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(9): 1744-1749. )

[8] 谷思玉,刘爽,孙佳玥,等. 施用不同种类尿素对大豆氮素积累及氮素利用率的研究[J]. 大豆科学,2013,32(5):654-658. (Gu S Y, Liu S, Sun J Y, et al. Effects of different types of urea on nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of soybean [J]. Soybean Science, 2013, 32(5): 654-658. )

[9] 盖志佳,张伟,蒋芳芳,等. 大豆根瘤及产量对生物糖氮肥和尿素的响应[J]. 核农学报,2016,30(4):822-827. (Gai Z J, Zhang W, Jiang F F, et al. Response of soybean root nodule and yield to biological-sugar nitrogen fertilizer and urea [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(4):822-827. )

[10] 张运红,吴礼树,刘一贤,等. 几种寡糖类物质对菜薹矿质养分吸收的影响[J]. 中国蔬菜,2009(20):17-22. (Zhang Y H, Wu L S, Liu Y X, et al. Effects of different oligosaccharides on mineral element absorption of *Brassica campestris* L. var. *utilis* Tsen et Lee [J]. China Vegetables, 2009(20):17-22. )

[11] 张朝霞,许加超,盛泰,等. 海藻寡糖(ADO)增效尿素对小麦的影响[J]. 农产品加工,2014(11):61-63, 66. (Zhang Z X, Xu J C, Sheng T, et al. Effects of alginate-derived oligosaccharides (ADO) synergistic urea on the wheat [J]. Farm Products Processing, 2014(11): 61-63, 66. )

[12] 张运红,孙克刚,杜君,等. 海藻寡糖增效尿素对水稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学,2016,45(1):53-56. (Zhang Y H, Sun K G, Du J, et al. Effects of alginate-derived oligosaccharides synergistic urea on yield and quality of rice [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(1):53-56. )

[13] 赵丽琴,吉明光,郑永贵,等. 施肥对大豆吸收氮磷钾的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2005,17(3):29-31. (Zhao L Q, Ji M G, Zheng Y G, et al. The effect of fertilizing on quantity of nitrogen, phosphorus and potassium utilized by soybeans [J].

- Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2005, 17 (3):29-31. )
- [14] 张伟明,管学超,黄玉威,等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报,2015,41(1):109-122. (Zhang W M, Guan X C, Huang Y W, et al. Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1):109-122. )
- [15] 王飞,林诚,何春梅,等. 不同有机肥对花生营养吸收、土壤酶活性及速效养分的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(2):57-83. (Wang F, Lin C, He C M, et al. Effects of applying different organic fertilizers on peanut nutrients absorption, soil enzyme activities and soil available nutrients [J]. Soil and Fertilizer in China, 2011(2):57-83. )
- [16] 张运红,申其昆,杜君,等. 不同小麦品种氮素利用效率特征差异的研究[J]. 麦类作物学报,2017,37(11):1503-1511. (Zhang Y H, Shen Q K, Du J, et al. Differences in the characteristics of nitrogen utilization efficiency of different wheat varieties [J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(11):1503-1511. )
- [17] 赵力汉,吴春胜,郭午. 施氮对大豆生长发育的影响[J]. 吉林农业大学学报,1993,15(1):12-16. (Zhao L H, Wu C S, Guo W. Effect of fertilizing nitrogen on the growth and development of soybean [J]. Journal of Jinlin Agricultural University, 1993, 15 (1):12-16. )
- [18] 王光华,金剑,潘相文,等. 不同氮肥对大豆根圈土壤酶活性和氮营养分布的影响[J]. 大豆科学,2003,22(3):213-217. (Wang G H, Jin J, Pan X W, et al. Effect of different N fertilizers on soil enzyme activity and N nutrition distribution across soybean rhizosphere [J]. Soybean Science, 2003, 22(3):213-217. )
- [19] 袁亮,赵秉强,林治安,等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(3):620-628. (Yuan L, Zhao B Q, Lin Z A, et al. Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2014,20(3):620-628. )
- [20] 周勇明,商照聪,宝德俊,等. 海藻酸尿素对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(3):23-26. (Zhou Y M, Shang Z C, Bao D J, et al. Effect of applying alginic acid urea on summer maize yield and N use efficiency[J]. Soil and Fertilizer in China, 2014(3):23-26. )
- [21] 张运红,孙克刚,杜君,等. 不同增效氮肥品种及用量对玉米幼苗生长、光合特性及养分吸收的影响[J]. 磷肥与复肥,2017,32(4):32-35. (Zhang Y H, Sun K G, Du J, et al. Effects of type and amount of synergistic nitrogen fertilizers on growth, photosynthetic characteristics and nutrient uptake of maize seedlings [J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2017, 32(4):32-35. )
- [22] Zhang Y H, Yin H, Wang W X, et al. Enhancement in photosynthesis characteristics and phytohormones of flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. var. *utilis* Tsen et Lee) by exogenous alginate oligosaccharides [J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2013, 11(1):669-675.
- [23] 张运红,孙克刚,杜君,等. 海藻寡糖增效尿素对水稻光合特性及碳代谢产物积累的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(3):54-59. (Zhang Y H, Sun K G, Du J, et al. Effects of alginate-derived oligosaccharides synergistic urea on the photosynthetic characteristics and accumulation of carbon metabolites in rice[J]. Soil and Fertilizer in China, 2016(3):54-59. )
- [24] 黄建林,王德汉,刘承昊,等. 载体尿素的研制及其释放机理研究初探[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(3):451-453. (Huang J L, Wang D H, Liu C H, et al. Study on the development of slow release carrier urea and its release mechanism[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3):451-453. )
- [25] Sun J Y, Zhao X H, Illeperumal W R K, et al. Highly stretchable and tough hydrogels [J]. Nature, 2012, 489:133-136.
- [26] 姜安龙,易晶晶,余晓青,等. 海藻酸钠水凝胶对尿素的缓释效果研究[J]. 现代化工,2015,35(7):86-88. (Jiang A L, Yi J J, Yu X Q, et al. Slow-releasing effect of sodium alginate hydrogel on urea [J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(7):86-88. )
- [27] 刘杰,张颖,普宪锋,等. 有机-无机复混肥对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆通报,2002(1):10-14. (Liu J, Zhang Y, Pu X F, et al. Effect of organic inorganic compound fertilizer on soybean yield and quality [J]. Soybean Bulletin, 2002(1):10-14. )
- [28] 朱宝国,于忠和,王囡囡,等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学,2010,29(1):97-100. (Zhu B G, Yu Z H, Wang N N, et al. Effect of different proportion combined application of organic and chemical fertilizer on soybean yield and quality [J]. Soybean Science, 2010, 29(1):97-100. )
- [29] 袁丽峰,黄腾跃,王改玲,等. 腐殖酸及腐殖酸有机肥对玉米养分吸收及肥料利用率的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(36):98-102. (Yuan L F, Huang T Y, Wang G L, et al. Effects of humic acid and humic organic fertilizer on nutrient allocation and fertilizer use efficiency of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(36):98-102. )
- [30] 黄清梅,肖植文,管俊娇,等. 海藻肥对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 西南农业学报,2015,28(3):1166-1170. (Huang Q M, Xiao Z W, Guan J J, et al. Effects of seaweed fertilizer on yield and agronomic characteristics of maize [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(3):1166-1170. )
- [31] Yazawa Y, Asakawa D, Matsueda D, et al. Effective carbon and nitrogen sequestrations by soil amendments of chareoal [J]. Journal of Arid Land Studies, 2006, 15(4):463-467.
- [32] 刘玮晶,刘烨,高晓荔,等. 外源生物炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(5):962-968. (Liu W J, Liu Y, Gao X L, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5):962-968. )